

JP 8167332 Super conductor

DIALOG(R)File 351:DERWENT WPI(c)1998 Derwent Info Ltd. All rts. reserv.  
010855108 \*\*Image available\*\*  
WPI Acc No: 96-352061/199635  
XRPX Acc No: N96-296933

Superconductor cable for e.g. superconductor generator, superconductor transformer, superconductor current limiter - has dummy lines twisted and arranged between odd and even number of superconductive bodies

Patent Assignee: SUMITOMO ELECTRIC IND CO (SUME )

Number of Countries: 001 Number of Patents: 001

Patent Family:

| Patent No  | Kind | Date     | Applicat No | Kind | Date     | Main IPC    | Week     |
|------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|----------|
| JP 8167332 | A    | 19960625 | JP 94309040 | A    | 19941213 | H01B-012/08 | 199635 B |

Priority Applications (No Type Date): JP 94309040 A 19941213

Patent Details:

| Patent     | Kind | Lan | Pg | Filing Notes | Application | Patent |
|------------|------|-----|----|--------------|-------------|--------|
| JP 8167332 | A    |     | 8  |              |             |        |

Abstract (Basic): JP 8167332 A

The cable includes several superconductive layers stranded around a core material (11). Each layer contains the same number of the superconductive bodies (12).

A dummy lines (13) are twisted with an arrangement between the odd and even number of superconductive bodies.

ADVANTAGE - Reduces AC loss and provides compact superconductor cable with heavy current capacity. Dwg.1/3

Derwent Class: X11; X12; X13

International Patent Class (Main): H01B-012/08

International Patent Class (Additional): H01B-013/00

Manual Codes (EPI/S-X): X11-H05; X12-C01E; X12-C05; X12-D06A; X13-C03

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項1】 芯材と、

前記芯材の周囲に燃られた偶数の超電導体層を備え、  
前記超電導体層の各々は同数の超電導体を含み、  
前記超電導体の燃り方向は奇数番目と偶数番目の前記超電導体層の間で互いに逆向きになっていることを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項2】 奇数番目と偶数番目の前記超電導体層の間で前記超電導体の燃りピッチが互いに等しいことを特徴とする請求項1に記載の超電導ケーブル。

【請求項3】 前記超電導体の各々は0.3mm以下の直径を有する1以上の同数の超電導素線を含むことを特徴とする請求項1または2に記載の超電導ケーブル。

【請求項4】 前記超電導体の各々は5 $\mu$ m以下の厚さの絶縁膜によって不完全に絶縁されていることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかの項に記載された超電導ケーブル。

【請求項5】 前記芯材は2.0mm以下の直径を有する1以上の芯材素線を含むことを特徴とする請求項1ないし4のいずれかの項に記載された超電導ケーブル。

【請求項6】 前記芯材は $1.0 \times 10^{-7} \Omega$ m以上の抵抗率を有し、常磁性CuM合金、SUS316L系合金、Ti合金、繊維強化プラスチック、ガラス繊維および有機繊維から選択された少なくとも1つを含み、前記MはNi、Mn、SiおよびVから選択された少なくとも1つを含むことを表わすことを特徴とする請求項1ないし5のいずれかの項に記載された超電導ケーブル。

【請求項7】 前記超電導素線および前記芯材素線の相対的な動きを制限するために、前記ケーブルは非金属材料で含浸されていることを特徴とする請求項1ないし6のいずれかの項に記載された超電導ケーブル。

【請求項8】 複数の前記超電導体層の間が互いに絶縁されていることを特徴とする請求項1ないし7のいずれかの項に記載された超電導ケーブル。

【請求項9】 複数の前記超電導体層の間はエポキシ系樹脂を含んだ繊維強化プラスチックテープで絶縁されていることを特徴とする請求項8に記載の超電導ケーブル。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は超電導ケーブルに関し、特に、超電導発電機、超電導変圧器、超電導限流器などの電力応用分野において用いられる交流用超電導ケーブルの改善に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】 交流用超電導ケーブルの容量を増大させる試みが、たとえば電気学会静止器回転機合同研究会資料第103頁～112頁（1992年12月3日発行）や電気学会研究会資料超電導応用電力機器研究会第31頁～40頁（1994年9月20日発行）などにおいて

なされている。

【0003】 図3は、前者の文献に開示された超電導ケーブルの一例の断面構造を示しており、そのようなケーブルは0.5Tの磁界のもとで1～2kA級の交流電流（50/60Hz）を流し得ることが報告されている。図3のケーブルは、常電導の一次芯線1の周囲に6本の超電導線2が燃られた一次燃線3を含んでいる。そして、7本の一次燃線3がさらに太径の常電導二次芯線4の周囲に燃られて、二次丸燃線のケーブル5が形成されている。なお、二次芯線4として平角形状の断面を有する芯材を用いることも可能であり、そのような二次芯材の周囲にたとえば15本の一次燃線3を燃った二次平角燃線を形成することも可能である。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】 図3に示されているような従来のケーブルには交流電流が200A程度または数百A程度の超電導素線2が用いられているが、実用規模の1kA以上の通電電流を有するケーブルを得るためには、超電導素線2や一次燃線3の本数を多く含むように設計せざるを得なかった。その理由は、超電導素線2が単体で用いられる場合に流し得る交流電流に比べて、ケーブル内に燃られて含まれている超電導素線1本が流し得る交流電流がたとえば約50%以下に低下するからである。そして、ケーブル内に燃られて含まれる超電導素線の本数が増大するに従って、超電導素線1本当りに流し得る交流電流が減少するので、1kA以上の大容量を有するコンパクトな超電導ケーブルを得ることが困難である。

【0005】 このようにケーブル内に燃り込まれる超電導素線の本数が増大するにつれて超電導素線1本当りに流し得る交流電流が減少する原因として、次の理由が考えられる。その理由の1つは、ケーブルの複雑な燃り構造に伴って超電導素線間のインダクタンスが不均一となってバランスが崩れるために、ケーブルの端末において超電導素線間に偏流が生じるからである。これは、特に、超電導素線表面に絶縁を施した場合に素線間の電流分流が不可能となるために顕著となる。もう1つの理由は、ケーブルを形成するために燃られた超電導素線の半径方向の電流成分が生じ、これによるケーブルの長さ方向の磁界が超電導素線に印加されて電氣的不安定性が生じることによると考えられる。

【0006】 図3に示されているようなケーブルにおける上述のような問題点を改善するために、特公平6-36329において、常電導の芯材の外周に沿って複数の超電導線を螺旋状に右巻き層と左巻き層が交互になるように巻付けることによって、交流損失の低減を図った超電導ケーブルが提案されている。このような構造を有するケーブルは内部の自発磁界を弱めることができ、ケーブルのインピーダンスの低減と同時に電流容量の増加を図る得ることが示されている。

【0007】しかしながら、このように隣接する超電導線の層の間に単に燃り方向を互いに逆向きにしただけの構造では、原理的に超電導素線間のインダクタンスの完全なバランス化が困難であり、長手方向磁界を完全に打消すことができない。すなわち、ケーブル内部の磁界を完全には0にすることができず、ケーブルのインピーダンスの低減にも限度があるので、電流容量の改善にも一定の限界がある。

【0008】そこで、本発明は、原理的に超電導素線のインダクタンスの完全なバランス化が可能であって、長手方向の内部磁界を完全に打消すことができ、大きな電流容量および／または小さな交流損失を有し得る交流用超電導ケーブルを提供することを目的としている。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による超電導ケーブルは、芯材の周囲に燃られた偶数の超電導層を備え、超電導層の各々は同数の超電導体を含み、それらの超電導体の燃り方向は奇数番目と偶数番目の超電導層の間で互いに逆向きになっていることを特徴としている。

【0010】奇数番目と偶数番目の超電導層の間で超電導体の燃りピッチが互いに等しければさらに好ましい。

【0011】超電導体の各々は、1本の超電導素線であってもよいし、複数の超電導素線を含む燃線であってもよい。

【0012】超電導素線の各々は、 $5\mu\text{m}$ 以下の厚さの絶縁膜によって不完全に絶縁されていることがさらに好ましい。

【0013】芯材は、 $2.0\text{mm}$ 以下の直径を有する1本の芯材素線または複数の芯材素線の燃線であってもよい。

【0014】芯材は $1.0 \times 10^{-7}\Omega\text{m}$ 以上の抵抗率を有することが好ましく、常磁性CuM合金、SUS316LK合金、Ti合金、繊維強化プラスチック、ガラス繊維、および有機繊維から選択された少なくとも1つを含むことができ、符号MはNi、Mn、Si、およびVから選択された少なくとも1つを含むことを表わしている。

【0015】超電導ケーブルは、超電導素線および芯材素線の相対的な動きを制限するために、非金属物で含浸されてもよい。

【0016】複数の超電導層の間は、互いに絶縁されてもよく、層間絶縁材料としてエポキシ系樹脂を含んだ繊維強化プラスチックテープを用いることができる。

【0017】

【作用】本発明による超電導ケーブルにおいては、奇数番目と偶数番目の超電導層の間で超電導体の燃り方向が逆向きになっており、かつそれらの超電導層は同数の超電導体を含むので、超電導体間のインダクタンスの完

全なバランス化を図ることができる。

【0018】さらに、奇数番目と偶数番目の超電導層の間で超電導体の燃りピッチが互いに等しければ、原理的に超電導体の半径方向の電流成分によるケーブルの長手方向の内部磁界を完全に打消すことができる。

【0019】超電導体の各々として、単一の超電導素線または複数の超電導素線の燃線を用いることができるが、超電導素線の外径を $0.3\text{mm}$ 以下にすれば、超電導素線において実用可能な交流電流を得ることができる。さらに超電導素線の燃りピッチを小さくできるので超電導ケーブルの交流損失が小さくなる。このような大容量の超電導ケーブルに用い得る超電導素線としては、Cu-30wt%Ni、Cu-Mn、Cu-Snなどの高抵抗合金中にNb-TiやNb<sub>3</sub>Snなどの複数のフィラメントが埋込まれた複合多芯線を用いることができる。このような複合多芯線におけるフィラメントの直径が $0.2\mu\text{m}$ 以下であれば、 $0.5\text{T}$ 前後の低磁界で高い交流電流密度を得ることができ、また、フィラメントに生じるヒステリシス損失を小さくすることができる。

【0020】超電導素線の各々が $5\mu\text{m}$ 以下の厚さの絶縁膜で不完全に絶縁されていれば、超電導素線間の結合損失の発生を低減できるとともに、超電導素線間の電流分流が可能であるためにケーブルの交流電流の低下を抑制することができる。絶縁膜としては、PVF（ホールマル）などの有機絶縁物、金属クロムなどの抵抗率の大きな金属材料、さらに酸化銅などの無機絶縁物を用いることができるが、これらの絶縁皮膜の厚さとしてはいずれも $5\mu\text{m}$ を超えないことが望まれる。絶縁膜の厚さが $5\mu\text{m}$ を超えれば、超電導素線間の絶縁が完全になって、冷却効率が悪くなることによる超電導特性の低下や、超電導素線間の分流が困難になることによるケーブルの交流電流の低下を生じる可能性が高くなる。

【0021】芯材としては単一の芯材素線または複数の芯材素線の燃線を用いることができる。しかし、芯材素線の直径が $2.0\text{mm}$ 以下であれば、芯材が導電性材料であってもその芯材中に発生する渦電流損失を抑制することができる。太径の芯材が必要な場合には、細い芯材素線の複数本を用いればよい。大容量ケーブルでは外径が大きくなるとともに芯材の直径も大きくなるので、芯材素線の適切な直径の選択も重要である。

【0022】芯材は、渦電流損失を小さくするために $1.0 \times 10^{-7}\Omega\text{m}$ 以上の抵抗率を有することが好ましく、そのような材料として、常磁性のCuM合金、SUS316L系合金、Ti合金、繊維強化プラスチック、ガラス繊維および有機繊維の少なくとも1つを選択することができる。ここで記号MはNi、Mn、Si、およびVから選択された少なくとも1つを含むことを表わす。ところで、 $1.0 \times 10^{-7}\Omega\text{m}$ 以上の抵抗率を有する材料であっても、強磁性材料は、強磁性ヒステリシス損失

を生じるので芯材として好ましくない。

【0023】超電導素線および芯材素線の相対的な動きを制限するために、ケーブルが非金属物で含浸されていればさらに好ましい。このようにケーブル内に含浸された非金属物は、素線間の相対的な動きを抑制することによってケーブルの交流通電電流の低下を防止し得るとともに、ケーブルが使用される環境に対する保護（超電導素線の錆止めやねずみによる被害に対する保護）の役割をも果たすことができる。

【0024】超電導素線の各々が絶縁されていない裸素線であって、超電導体層間が絶縁されているケーブルは高電圧の工業機器に用いることができ、この層間絶縁材料として、エポキシ樹脂を含んだFRP（繊維強化プラスチック）テープが好ましく用いられ得る。このFRPとしては、ガラス繊維強化プラスチック（GFRP）やカーボン繊維強化プラスチック（CFRP）を用いることができる。特に、層間絶縁材料として未硬化のエポキシ系樹脂を含んだプリプレグテープを用いれば、燃らせた超電導素線の固定と層間絶縁の両方の作用を得ることができる。また、芯材の周囲に燃らせた超電導素線の第1層目の上に付与されたプリプレグテープを硬化させた後に、第2層目の超電導素線の燃線を実施することによって、長尺の超電導ケーブルの製作が容易になる。さらに、この構造では、層内の素線間を接触させることによって素線間の分流が可能となるため、交流の通電電流が\*

\*大きくなる作用を生じる。しかも、層間は絶縁されているので、素線間の結合損失（この結合損失は層内では小さく、層間で大きい）も低減できる作用を生じる。

【0025】

【実施例】図1は、本発明の一実施例による超電導ケーブルの断面構造を概略的に示している。この超電導ケーブルにおいては、比較的太い直径を有する単一の芯材11の周囲に、21本の超電導体12が第1の超電導体層として燃らされている。この第1の超電導体層の周囲には、同じく21本の超電導体12が第2の超電導体層として燃らされている。これら2つの超電導体層の燃り方向は互いに逆向きにされている。図1において、矢印Sは右巻き方向を表わし、矢印Zは左巻き方向を表わしている。第2の超電導体層は第1の超電導体層に比べて長い周囲長を有しているため、第2の超電導体層は、第1の超電導体層と同数の超電導体を含むとともに、6本のダミー線13を含んでいる。

【0026】図1に示されているような超電導ケーブルは、2つの超電導体層だけでなくさらに多くの偶数の超電導体層を含み得ることは言うまでもない。また、超電導体12としては、単一の超電導素線のみならず、複数本の超電導素線を含む燃線を用いることもできる。

【0027】

【表1】

|                                        | ケーブル1A                                                                                  | ケーブル1B                                                                                  | ケーブル1C                                                                                  |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 超電導素線径                                 | 0.2 mmφ                                                                                 | 0.2 mmφ                                                                                 | 0.2 mmφ                                                                                 |
| 燃線構造                                   | 1次燃線：1次芯線1本+超電導素線6本<br>2次燃線：2次芯線1本+1次燃線7本                                               | 第1層：芯線の周囲に超電導素線21本<br>第2層：第1層の周囲に常電導素線6本+超電導素線21本                                       | 第1層：芯線の周囲に超電導素線21本<br>第2層：第1層の周囲に常電導素線6本+超電導素線21本                                       |
| 燃りピッチ                                  | 5mm（1次燃線）<br>18mm（2次燃線）                                                                 | 18mm（第1層、第2層）                                                                           | 18mm（第1層、第2層）                                                                           |
| 芯線材質<br>芯線抵抗率                          | Cu-10wt%Ni<br>$1.2 \times 10^{-7} \Omega m$                                             | Cu-10wt%Ni<br>$1.2 \times 10^{-7} \Omega m$                                             | Cu-2wt%Ni<br>$0.7 \times 10^{-7} \Omega m$                                              |
| ケーブルの交流通電電流<br>超電導素線の交流損失<br>ケーブルの交流損失 | 1400Apeak(0.5T)<br>15kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz)<br>35kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz) | 2100Apeak(0.5T)<br>15kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz)<br>17kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz) | 2050Apeak(0.5T)<br>15kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz)<br>28kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz) |

【0028】表1において、図3に示された構造を有する超電導ケーブルと図1に示された構造を有する超電導ケーブルの交流電流特性が比較されて示されている。すなわち、ケーブル1Aは図3に示されているような従来の燃り構造を有し、ケーブル1Bと1Cは図1に示されているような本発明の一実施例による燃り構造を有している。

【0029】ケーブル1A～1Cのいずれにおいても、単一の超電導体として0.2mm直径のNbTi超電導※50

※素線が用いられている。この超電導素線は、Cu-30wt%Niのマトリックス内に埋込まれた0.12μm径の多数のNbTiフィラメントを含んでおり、1.0mmのピッチでツイストされている。

【0030】ケーブル1Aにおいては、一次燃線3は5mmのピッチで燃らされており、二次燃線5は18mmのピッチで燃らされている。他方、ケーブル1Bと1Cにおいては、第1層目と第2層目の超電導素線12は、いずれも18mmのピッチで燃らされている。第1層目はS方

向に撚られており、第2層目はZ方向に撚られている。

【0031】ケーブル1Aにおける芯線1および4の材質としてCu-10wt%Niが用いられており、これは $1.2 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ の抵抗率を有している。ケーブル1Bの芯線11とダミー線13は、ケーブル1Aの芯線と同じ材質を有している。他方、ケーブル1Cの芯線11とダミー線13は、Cu-2wt%Niの材質と $0.7 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ の抵抗率を有している。

【0032】ケーブル1A～1Cについて、外部横磁界0.5Tのもとに液体ヘリウム中で50Hzの周波数における交流電圧試験と交流損失試験が行なわれた。表1からわかるように、本発明による図1の構造を有するケーブル1Bと1Cは、先行技術による図3の構造を有するケーブル1Aに比べて大きな交流電流と小さな交流損失を有することが明らかである。

\*

|                                      | ケーブル2A                                                                                  | ケーブル2B                                                                                  |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 超電導素線径                               | 0.15mmφ                                                                                 | 0.15mmφ                                                                                 |
| 撚線構造                                 | 1次撚線：1次芯線0本+超電導素線3本<br>2次撚線：2次芯線1本+超電導1次撚線6本<br>3次撚線：3次芯線1本+超電導2次撚線7本                   | 1次撚線：超電導素線3本<br>第1層：芯線の周囲に超電導1次撚線21本<br>第2層：第1層の周囲に常電導線6本+超電導1次撚線21本                    |
| 撚りピッチ                                | 3mm（1次撚線）<br>10mm（2次撚線）<br>27mm（3次撚線）                                                   | 3mm（1次撚線）<br>27mm（第1層、第2層）                                                              |
| 芯線材質<br>芯線抵抗率                        | Cu-30wt%Ni<br>$3.7 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$                                      | Cu-30wt%Ni<br>$3.7 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$                                      |
| ケーブルの交流電流<br>超電導素線の交流損失<br>ケーブルの交流損失 | 2500Apeak(0.5T)<br>35kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz)<br>75kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz) | 4300Apeak(0.5T)<br>35kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz)<br>37kW/m <sup>2</sup> (0.5T, 50Hz) |

【0035】表2においては、図3の構造に類似する構造を有するケーブル2Aと図1の構造に類似する構造を有するケーブル2Bの交流電流特性が比較されて示されている。すなわち、ケーブル2Aと2Bはそれぞれ図3と図1に類似する構造を有しているが、超電導体2および12として、0.15mm直径を有する3本のNb<sub>3</sub>Sn超電導素線が3mmのピッチで撚られた一次撚線が用いられている。この超電導素線は、Cu-10wt%Snのマトリックス中に埋込まれた0.2μm径の多数のNb<sub>3</sub>Snフィラメントを含んでおり、1.0mmのピッチでツイストされている。

【0036】ケーブル2Aは10mmの二次撚りピッチと27mmの三次撚りピッチを有しており、ケーブル2Bにおいては、超電導体層の第1層と第2層ともにケー※

\*【0033】また、図1に示された同一の構造を有するケーブル1Bと1Cの比較において、 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ より大きな非抵抗を有する芯線を含むケーブル1Bの方が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ の非抵抗を有する芯線を含むケーブル1Cより優れた交流電流特性を有することが明らかである。特に、ケーブル1Bはケーブル1Cに比べて小さな交流損失を有しており、その交流損失の値17kW/m<sup>3</sup>は超電導素線単体の交流損失15kW/m<sup>3</sup>からほとんど増大していないことがわかる。すなわち、本発明による構造を有するケーブルにおいて、芯材は $1 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以上の抵抗率を有することがさらに好ましいことがわかる。

【0034】

【表2】

※ブル2Aの三次撚りピッチと同じ27mmの撚りピッチを有している。芯線の材質としては、ケーブル2Aと2Bのいずれにおいても、 $3.7 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ の抵抗率を有するCu-30wt%Niが用いられている。

【0037】ケーブル2Aと2Bに関して、表1の場合と同様に交流電流特性が測定され、その結果が表2に示されている。表2から明らかのように、図3と図1の構造において超電導体2および12として複数本の超電導素線を含む一次撚線を用いた場合にも、図1の構造を有するケーブル2Bの方が図3の構造を有するケーブル2Aより優れた交流電流特性を有することがわかる。

【0038】

【表3】

| ケーブル                                                                        | 3 A           | 3 B           | 3 C           | 3 D           |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 第1層<br>超電導素線数<br>撚りピッチ (mm)<br>撚り方向                                         | 21<br>18<br>S | 21<br>18<br>S | 21<br>18<br>S | 21<br>14<br>S |
| 第2層<br>超電導素線数<br>撚りピッチ (mm)<br>撚り方向                                         | 21<br>18<br>Z | 21<br>18<br>S | 27<br>18<br>Z | 21<br>18<br>Z |
| 特性 (0.5T, 50Hz)<br>交流通電電流 (A <sub>peak</sub> )<br>交流損失 (kW/m <sup>3</sup> ) | 2100<br>17    | 1950<br>24    | 2070<br>32    | 1650<br>17    |

【0039】表3は、図1の構造を有するケーブルにおける各超電導体層中の超電導素線の本数、撚り方向、および撚りピッチがケーブルの交流電流特性に及ぼす影響を示している。

【0040】表3において、ケーブル3Aは表1中のケーブル1Bと同じものである。すなわち、ケーブル3A中の第1と第2の超電導体層の各々は18mmのピッチで撚られた21本の超電導素線を含んでおり、それらの層の間において撚り方向は逆向きにされている。他方、ケーブル3Bはケーブル3Aに類似しているが、第1と第2の超電導層の間において撚り方向が同一にされている。したがって、ケーブル3Bにおいては、ケーブル3Aに比べて交流通電電流が少し劣っており、交流損失はかなり増大している。

【0041】ケーブル3Cは、ケーブル3Aに類似しているが、第1と第2の超電導体層に含まれる超電導素線の本数が互いに異なっている。すなわち、ケーブル3Cにおいては、図1中の6本のダミー線13が超電導素線に置き換えられ、第2の超電導体層に含まれる超電導素線の本数が27に増大されている。したがって、ケーブル3Cは、ケーブル3Aに比べてほぼ同等の交流通電電流\*

\*を有しているが、交流損失が大幅に増大している。

【0042】ケーブル3Dはケーブル3Aに類似しているが、第1と第2の超電導体層の間において撚りピッチが少し異なっている。その結果、ケーブル3Dはケーブル3Aに比べて交流通電電流が大幅に低下している。しかし、ケーブル3Dの交流損失は、ケーブル3Aと同等の低い値を維持している。

【0043】表3から明らかなように、図1に示されているような構造を有する超電導ケーブルは、互いに隣接する超電導体層が同一のピッチで撚られた同数の超電導素線を含み、かつそれらの層の間の撚り方向が互いに逆向きであることが最も好ましいことがわかる。なお、ケーブル3Dにおけるように隣接する超電導体層の間で撚りピッチが少し異なっている場合は、交流通電電流がかなり低下するが、交流損失は低い値を維持し得るので、隣接する超電導体層間で撚りピッチが多少異なっている素線数が同じで撚り方向が逆向きであるケーブルは、用途によっては有用であり得る。

【0044】

【表4】

| ケーブル                                         | 4 A                  | 4 B                  | 4 C                  | 4 D                  | 4 E        |
|----------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| 超電導素線絶縁                                      | なし                   | なし                   | なし                   | PVF5 $\mu$ m         | なし         |
| 芯材素線数                                        | 1                    | 7                    | 7                    | 7                    | 1          |
| 芯材素線径 (mm $\phi$ )                           | 1.2                  | 0.4                  | 0.4                  | 0.4                  | 1.2        |
| 芯材材質                                         | SUS316LN             | SUS316LN             | SUS304               | SUS316LN             | GFRP       |
| 芯材抵抗率 ( $\Omega$ m)                          | $5.4 \times 10^{-7}$ | $5.4 \times 10^{-7}$ | $5.4 \times 10^{-7}$ | $5.4 \times 10^{-7}$ | $>10^{-9}$ |
| 特性 (0.5T, 50Hz)<br>交流損失 (kW/m <sup>3</sup> ) | 17                   | 16                   | 45                   | 15                   | 15         |

【0045】表4は、超電導素線の不完全な絶縁と芯材

※影響を示している。

の構造や材質とが超電導ケーブルの交流損失に及ぼす影響※50 【0046】表4において、ケーブル4Aは表1のケー

ブル1 Bに類似しているが、芯材の材質のみが $5.4 \times 10^{-7}$ の抵抗率を有するステンレス鋼SUS316LNに変更されている。このケーブル4 Aは、ケーブル1 Bと同じ $17 \text{ kW/m}^3$ の交流損失を有している。

【0047】ケーブル4 Bは、ケーブル4 Aに類似しているが、芯材として0.4 mmの直径を有する7本の芯材素線を含む燃線が用いられている。その結果、ケーブル4 Bはケーブル4 Aに比べて、交流損失が少し小さくなっている。すなわち、細い複数の芯材素線を含む燃線を芯材として用いることによって、渦電流損失を抑制し

てケーブルの交流損失を低減させ得ることがわかる。【0048】ケーブル4 Cはケーブル4 Bに類似しているが、芯材の材質がステンレスSUS304に変更されている。その結果、ケーブル4 Cにおいては交流損失が著しく増大している。この理由は、ステンレスSUS304に起因する強磁性ヒステリシスが発生しているからである。

【0049】ケーブル4 Dは、ケーブル4 Bに類似しているが、超電導素線の各々が $5 \mu\text{m}$ の厚さを有するPVF絶縁膜によって不完全に絶縁されている。その結果、ケーブル4 Dはケーブル4 Bに比べてさらに減少した交流損失を有している。その理由は、超電導素線間を不完全に絶縁することによってそれらの素線間の結合損失の発生を低減すると同時に、素線間の電流分流を可能にすることによって交流通電電流の低下を抑制し得るからで\*

\*ある。

【0050】ケーブル4 Eはケーブル4 Aに類似しているが、芯材の材質が $10^{-3} \Omega\text{m}$ より大きな抵抗率を有するGFRPに変更されている。その結果、ケーブル4 Eは、ケーブル4 Aに比べて小さな交流損失を有している。その理由は、ケーブル4 Eの芯材であるGFRPが非常に大きな抵抗率を有しているため、芯材中の渦電流損失が大幅に抑制されるからである。

【0051】なお、表4のいずれのケーブルにおいても芯材として2.0 mm以下の直径を有する芯材素線を含んでいるので、渦電流損失に基づくケーブルの交流損失の大きな増大は観測されていない。しかし、芯材素線の直径が1.2 mmであるケーブル4 Aと芯材素線の直径が0.4 mmであるケーブル4 Bを比較すれば、交流損失において $1 \text{ kW/m}^3$ の差が存在する。このことから、芯材素線の直径が2 mmになれば、渦電流損失に基づく交流損失は芯材素線の直径の4乗に比例するので、交流損失の差は $7.7 \text{ kW/m}^3$ になると試算できる。このような交流損失の増大は実用上のケーブルにおいても問題となる。したがって、ケーブルの芯材に含まれる芯材素線の直径は2.0 mm以下であることが好ましい。

【0052】

【表5】

|                                                               | コイルA            | コイルB            | コイルC                | コイルD                | コイルE                |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ケーブル<br>層間絶縁<br>エポキシ含浸                                        | 1 B<br>なし<br>なし | 1 B<br>なし<br>あり | 5 A<br>ナリグテープ<br>あり | 5 B<br>FRPテープ<br>なし | 5 B<br>FRPテープ<br>あり |
| 特性 (50Hz, 4.2K)<br>交流通電電流 (Apeak)<br>交流損失 ( $\text{kW/m}^3$ ) | 1100<br>28      | 1480<br>18      | 1650<br>17.5        | 1030<br>25          | 1450<br>17          |

【0053】表5は、超電導ケーブル中の超電導素線や芯材素線における相対的な動きを抑制する含浸材および隣接する超電導層間に挿入される絶縁膜がケーブルの交流電流特性に及ぼす影響を示している。表5において、同一の寸法形状を有するコイルが種々の超電導ケーブルを用いて形成された。すなわち、コイルA～Eのいずれにおいても、100 mmの外径と150 mmの長さを有するGFRP筒の回りに超電導ケーブルが5 mmのピッチで12ターンの巻数で1層だけ巻かれている。このようなコイルにおいて、1000 Apeak時にケーブルに印加される最大磁界は0.2 Tである。

【0054】コイルAにおいては表1の超電導ケーブル1 Bが用いられており、そのコイルAはケーブルの張力のみによって固定されている。

※【0055】一方、コイルBにおいてはコイルAと同様にケーブル1 Bが用いられているが、コイルBにおいては超電導ケーブルがエポキシ含浸されるとともにコイル全体が厚いエポキシ層で覆われて固定されている。その結果、コイルBにおいては超電導ケーブル内の超電導素線や芯材素線の相対的な動きが抑制されるので、コイルAに比べて通電電流が増大しかつ交流損失が減少している。

【0056】コイルCにおいては、図2に示されているような超電導ケーブルが用いられている。図2のケーブルは図1のものと類似しているが、芯材11、第1の超電導体層、および第2の超電導体層のそれぞれの間に層間絶縁膜14が設けられている点においてのみ異なっている。すなわち、コイルCに用いられているケーブル5

13

Aにおいては、FRPファイバを編んだFRPテープに未硬化のエポキシ樹脂を含浸させた厚さ0.1mmのプリプレグテープが層間絶縁膜として用いられている。コイル4Cは、ケーブル5Aが巻かれた後に150℃で15時間の熱処理が施されることによってエポキシ樹脂が硬化させられており、ケーブル内に適当な量のエポキシ樹脂が含まれている。その結果、コイルCにおいてはケーブル中の各素線の相対的な動きが抑制されるとともに超電導体層間が絶縁されているので、コイルBに比べて交流損失はあまり変わらないが通電電流がさらに増大している。

【0057】コイルDにおいては、ケーブル5Bが用いられている。ケーブル5Bはケーブル5Aに類似しているが、ケーブル5Bにおいては層間絶縁膜としてエポキシ樹脂を含まない0.1mm厚さのFRPテープが用いられている点においてのみ異なっている。また、コイルDにおいては、コイルAと同様にケーブルの張力のみによって固定されている。その結果、コイルDにおいては層間絶縁膜としてのFRPテープがエポキシ樹脂を含んでいないのでコイルCに比べて交流電流特性が劣っているが、層間絶縁膜を含まないコイルAに比べれば交流損失が改善されている。

【0058】コイルEにおいてはコイルDの場合と同様にケーブル5Bが用いられている。しかし、コイルEにおいては、コイルBの場合と同様にケーブル5Bがエポキシ樹脂によって含浸されるとともに、コイル全体が厚

14

いエポキシ樹脂によって固定されている。その結果、コイルEはコイルBの場合と同様1400A peakを超える通電電流を有するとともにFRPテープの層間絶縁膜による効果によって交流損失がさらに低減している。

【0059】表5の結果から、超電導ケーブルを用いたコイルにおいては、ケーブル内の各素線間の相対的な動きを抑制する含浸材を含むとともに層間絶縁膜を含むことが好ましいことがわかる。

【0060】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、実用規模の大電流容量と小さな交流損失を兼ね備えたコンパクトな交流用超電導ケーブルを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例による超電導ケーブルの横断面図である。

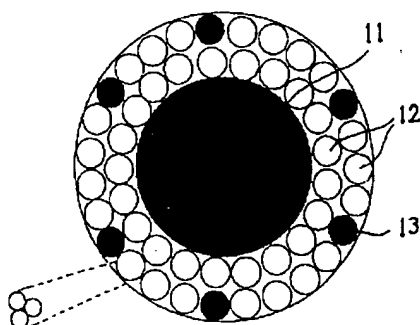
【図2】本発明のもう一つの実施例による超電導ケーブルの横断面図である。

【図3】先行技術による超電導ケーブルの横断面図である。

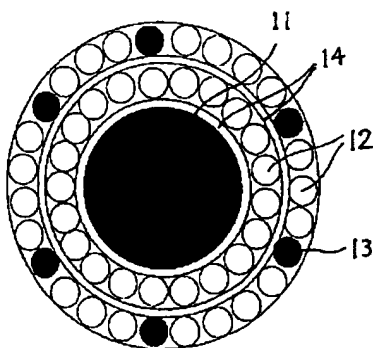
【符号の説明】

- 11 芯材
- 12 超電導体
- 13 ダミー線
- S 右撚方向
- Z 左撚方向

【図1】



【図2】



【図3】

